
Телекомунікації, радіолокація, радіонавігація та електроакустика

УДК 621.396

**ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ
РАДІОКЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ¹**

Бичковський В. О., к.т.н., доцент Реутська Ю. Ю., асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,
reutska_rtf@ukr.net

**THE ACCURACY AND EFFICIENCY ESTIMATION OF MOVING
OBJECTS RADIO CONTROL SYSTEMS**

Bychkovskyi V. O., Cand. of Sci. (Techn.), associate prof. Reutska Yu. Yu., assistant
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,
reutska_rtf@ukr.net

Вступ

Сучасні системи радіокерування (СРК) — це комплекс функціонально пов'язаних пристроїв, які вирішують задачу керування об'єктами та процесами за допомогою радіотехнічних засобів. Що стосується радіокерування рухомими об'єктами, то такі системи вирішують просторово-часову задачу доставки керованого об'єкта до цілі [1].

Оскільки система радіокерування є складною системою, то її дослідження передбачає три основних підходи: матеріальний, енергетичний, інформаційний. Перший підхід відповідає на питання щодо складу системи, другий підхід з'ясовує питання характеру та рівня взаємодії елементів системи. Інформаційний підхід вирішує найскладнішу задачу стосовно того, чому система поводить себе так, а не інакше, що керує нею та з якою метою. З інформаційним підходом тісно пов'язані логіка, методологія та найсучасніші методи досліджень складних систем [2, 3, 4]. Процеси керування за своїм змістом невіддільні від інформаційних процесів, тому зрозумілою стає доцільність дослідження систем радіокерування методами теорії інформації [5, 6]. З макроскопічної точки зору система радіокерування (СРК) вирішує задачу зустрічі керованого об'єкта з ціллю за рахунок виділення з всього об'єму Q_0 , де в принципі може знаходитися ціль деякого об'єму Q_{Π} , необхідного для виконання поставленого завдання. З цією метою в систему керування необхідно ввести та переробити інформацію $I = \log_2(Q_0/Q_{\Pi})$ (біт) або $I = \ln(Q_0/Q_{\Pi})$ (ніт) [6]. Подальший перехід до радіотехнічних характеристик системи радіокерування та геометричних співвідношень в задачах наведення об'єкту на ціль дає можливість

¹ Електронний варіант статті: <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1079>

з'ясувати основні показники системи радіокерування [3, 6, 7]. Незважаючи на доцільність такого підходу для розв'язання деяких задач, у випадку оцінки ефективності систем радіокерування динаміка процесу залишається прихованою. Таким чином, оцінка ефективності систем радіокерування рухомим об'єктом залишається актуальною задачею.

Постановка задачі

З метою розкриття динаміки процесу керування введемо у розгляд поряд з об'ємом Q_0 деякий поточний об'єм Q . В процесі наведення рухомого об'єкта на ціль поточний об'єм Q постійно зменшується за рахунок надходження керуючої інформації I в контур керування. Нехай K — константа швидкості зменшення Q у разі надходження інформації I . Тоді можна записати $dQ / dI = -KQ$, або

$$\frac{dQ}{Q} = -KdI. \quad (1)$$

Інтегруючи ліву частину рівняння (1) від Q_0 до $Q_{\text{ц}}$, а праву від 0 до I , визначаємо

$$I = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{Q_0}{Q_{\text{ц}}}\right) \quad (2)$$

Аналіз формули (2) показує, що коефіцієнтом K можна врахувати факт вимірювання інформації в біт або ніт та характер інформаційної підтримки процесу керування на різних ділянках траєкторії. З метою розв'язання поставленої задачі необхідно в рівнянні (1) врахувати додаткові показники, оцінити вплив втрат інформації та швидкості надходження інформації від керуючої частини до об'єкту керування та перейти від об'єму Q до лінійних відхилень об'єкту керування від цілі. З іншого боку, в моделі (1) не враховані потенційні можливості системи радіокерування, оскільки потенційні значення Q залишаються прихованими. Таким чином, рівняння (1) потребує подальшої корекції.

Теоретичні викладки

Прийmemo до уваги, що за умови збільшення кількості інформації I величина Q поступово зменшується та асимптотично наближається до свого потенційно можливого мінімального значення $Q_{\text{п}}$. Таким чином, $dQ = -K(Q - Q_{\text{п}})dI$, або

$$\frac{dQ}{dI} = -K(Q - Q_{\text{п}}) \quad (3)$$

Перепишемо рівняння (3) у вигляді

$$\frac{dQ}{Q - Q_{\Pi}} = -KdI$$

та проінтегруємо ліву частину від Q_0 до Q , а праву від 0 до I . Тоді отримаємо наступний результат:

$$\frac{\frac{Q_0}{Q_{\Pi}} - 1}{\frac{Q}{Q_{\Pi}} - 1} = \exp(KI). \quad (4)$$

Якщо домінуючих напрямів місцезнаходження цілі не існує, то Q_0 , Q та Q_{Π} можна розглядати як кулі з радіусами R_0 , R та R_{Π} . Оскільки $Q_0 = 4\pi R_0^3 / 3$, $Q = 4\pi R^3 / 3$, $Q_{\Pi} = 4\pi R_{\Pi}^3 / 3$, то на підставі формули (4) визначаємо

$$R = R_{\Pi} \left[1 + \left(\frac{R_0^3}{R_{\Pi}^3} - 1 \right) \exp(-KI) \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Для ситуації на площині в умовах відсутності домінуючих напрямів місцезнаходження цілі можна розглядати кола з площами $S_0 = \pi R_0^2$, $S = \pi R^2$, $S_{\Pi} = \pi R_{\Pi}^2$. Тоді на підставі формули (4) знаходимо

$$R = R_{\Pi} \left[1 + \left(\frac{R_0^2}{R_{\Pi}^2} - 1 \right) \exp(-KI) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Введемо у розгляд параметр $m = 3$, для випадку ситуації у просторі та $m = 2$ для ситуації на площині. Тоді на підставі формул (5), (6) можна записати

$$R = R_{\Pi} \left[1 + \left(\frac{R_0^m}{R_{\Pi}^m} - 1 \right) \exp(-KI) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (7)$$

Прийmemo до уваги, що $I = \ln N$, де N — інформаційна спроможність [9]. Тоді на підставі формули (7) знаходимо

$$R = R_{\Pi} \left[1 + \left(\frac{R_0^m}{R_{\Pi}^m} - 1 \right) N^{-K} \right]^{\frac{1}{m}}.$$

Рівняння (7), (8) не охоплюють динаміку процесу керування. Перейде-

мо до динамічної складової поставленої задачі. З цією метою приймемо до уваги, що в СРК організоване постійне надходження інформації від керуючої частини до об'єкта керування з деякою швидкістю C_K . В об'єкті керування інформація частково втрачається за рахунок дії завад та невизначеності характеристик об'єкта керування [8]. Нехай $I = I(t)$ — кількість інформації, доступної об'єкту керування. Якщо K_1 — константа швидкості втрат інформації, то можна записати

$$\frac{dI}{dt} = C_K - K_1 I. \quad (8)$$

Перепишемо рівняння (8) у вигляді

$$\frac{dI}{dt} + K_1 I = C_K$$

та після інтегрування за початкових умов $t = 0$, $I = 0$ знайдемо

$$I = \frac{C_K}{K_1} [1 - \exp(-K_1 t)]. \quad (9)$$

Таким чином, враховуючи формули (7), (9) можна визначити R за умови втрат інформації:

$$R_B = R_{\Pi} \left[1 + \left(\frac{R_0^m}{R_{\Pi}^m} - 1 \right) \exp \left(-\frac{K C_K}{K_1} (1 - \exp(-K_1 t)) \right) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (10)$$

Проаналізуємо залежності (7), (10). Згідно залежності (7) в системі без втрат інформації за умови $I = C_K t$

$$R = R_{\Pi} \left[1 + \left(\frac{R_0^m}{R_{\Pi}^m} - 1 \right) \exp(-K C_K t) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (11)$$

Отже, є можливість порівняти можливості системи радіокерування з втратами інформації в об'єкті керування з ідеальною системою.

Визначити C_K можна декількома способами:

1. В межах інформаційного класу каналу керування [10].
2. На підставі співвідношення між C_K та пропускною спроможністю C каналу керування [6].

В загальному випадку клас каналу керування може бути невідомим. Тоді необхідно провести ідентифікацію каналу методом моделей заміщення [11, 12]. В цьому випадку

$$C_K = F(N_K) \log_2 N_K, \quad (12)$$

де $F(N_K)$ — частотно-квантова спроможність каналу керування, N_K — інформаційна спроможність каналу керування. Так, для моделі заміщення першого типу першого порядку рівняння (12) приймає вигляд

$$C_K = \frac{1}{T_K \ln 2 N_K} \log_2 N_K,$$

де T_K — постійна часу каналу керування.

Розглянемо ситуацію, коли відомою є пропускна спроможність каналу керування:

$$C = F_K \ln \left(1 + \frac{P_C}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (13)$$

де F_K — смуга пропускання каналу керування; де P_C — потужність сигналу, $P_{\text{ш}}$ — потужність шуму. Введемо у розгляд параметр $\delta = (C - C_K)/C$. Тоді, враховуючи формули (13), визначаємо для умови, коли відомою є пропускна спроможність каналу керування:

$$\frac{C_K}{K_1} = \ln \left(1 + \frac{P_C}{P_{\text{ш}}} \right)^{\frac{(1-\delta)F_K}{K_1}}. \quad (14)$$

Рівняння (14) дає можливість визначити I згідно формули (9) та R згідно формули (11).

Прийmemo до уваги, що для розрахунків доцільно використовувати нормовані величини, які змінюються від 0 до 1 [2]. Отже, введемо у розгляд коефіцієнт ефективності

$$K_e = \frac{R_0 - R_{\text{в}}}{R_0 - R},$$

який змінюється від 0 до 1, тобто відповідає заданим умовам. Таким чином, представляється можливим порівнювати системи радіокерування як за точністю, так і за ефективністю, враховуючи динаміку інформаційної підтримки процесу керування.

Висновки

Просторово-часова задача радіокерування рухомим об'єктом може розглядатися з інформаційної точки зору з врахуванням потенційних можливостей системи, яка забезпечує процес керування. В разі такого підходу представляється можливим визначити залежність точності радіокерування від рівня інформаційної підтримки процесу керування, встановити вплив втрат інформації в об'єкті керування та вплив швидкості надходження інформації з керуючої частини на точність радіокерування. За умови проведення ідентифікації каналу керування можна врахувати вплив його частот-

но-квантової спроможності та інформаційної спроможності на точність радіокерування, або безпосередньо врахувати вплив потужності сигналу, потужності шуму та смуги пропускання каналу керування. Оцінку ефективності каналу керування можна провести за допомогою коефіцієнта ефективності, який враховує початкові умови і можливості систем керування з втратами та без втрат інформації.

Отримані результати дають можливість перейти від статичного до динамічного варіанту оцінки точності та ефективності систем радіо керування, враховуючи їх інформаційні показники.

Перелік посилань

1. Меркулов В. И. Авиационные системы радиоправления. Том 1. Принципы построения систем радиоправления. Основы синтеза и анализа. / Под ред. А. И. Конащенкова, В. И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2003. – 192 с. – ISBN 5-93108-035
2. Згуровський М. З. Основи систематичного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К. : Видавнича група BVH, 2007. – 544 с. – ISBN 978-966-552-153-2
3. Бычковский В. А. Авиационные системы радиоправления. – К. КВВАИУ, 1985. – 100 с.
4. Бичковський В. О. Оцінка ефективності інформаційно-керуючих систем / В. О. Бичковський, С. П. Циганенко // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – №50. – с. 60–65.
5. Бичковський В. О. Оцінка точності та ефективності систем радіокерування / В. О. Бичковський, Ю. Ю. Реутська // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи ; матер. міжнар. науково-технічної конф. ; 16 – 22 березня 2015 р, м. Київ ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін.-т». – 2015. – с. 157-159.
6. Коган И. М. Теория информации и проблемы ближней радиолокации. – М.: Сов. радио, 1968. – 144 с.
7. Бичковський В. О. Макроскопічний аналіз задачі радіокерування / В. О. Бичковський, Ю. Ю. Реутська // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014. – №55. – с. 89-96.
8. Красовский А. А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. – М.: Физматгиз, 1963. – 468 с.
9. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. – М.: Энергия, 1968. – 248 с.
10. Ацюковский В. А. Построение систем связей комплексов оборудование летательных аппаратов. – М. : Сов. Радио, 1974. – 160 с.
11. Остапенко Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: Задруга, 1999. – 424 с.
12. Бичковський В. О. Функціональні можливості моделей заміщення систем / В. О. Бичковський, Ю. Ю. Реутська // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2009. – №39. – с. 23-26.

References

1. Merkulov V. I. and Konashchenkova A. I. eds. (2003) *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya. Tom 1. Printsipy postroeniya sistem radioupravleniya. Osnovy sinteza i analiza* [Aviation radio control system. Volume 1. Principles of radio control systems. Basics of synthesis and analysis]. Moskow, Radiotekhnika, 192 p. – ISBN 5-93108-035

2. Zhurovskiy M. Z. and Pankratova N. D. (2007) *Osnovy systematichnoho analizu* [Based on a systematic analysis], Kyiv, Vydavnycha hrupa BHV, 544 p. – ISBN 978-966-552-153-2
3. Bychkovskii V. A. (1985) *Aviatsionnye sistemy radioupravleniya* [Aviation radio control system]. Kiev, KVVAIU Publ., 100 p.
4. Bychkovsky, V. A., Tsyganenko, S. P. (2012) The information-control systems efficiency assessment. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, no. 50, pp. 60-65. (in Ukrainian)
5. Bychkovskiy V. O. and Reutskaya Iu. Iu. (2015) Otsinka tochnosti ta efektyvnosti system radiokeruvannia [Evaluation of the accuracy and efficiency of radio control systems]. *Radiotekhnichni polia, syhnaly, aparaty ta systemy, RTPSAS-2015*, pp. 157-159.
6. Kogan I. M. (1968) *Teoriya informatsii i problemy blizhnei radiolokatsii* [Information Theory and problems of short-range radar]. Moscow, Sov. radio, 144 p.
7. Bychkovskiy, V. O., Reutskaya, Yu. Yu. (2013) The macroscopic analysis of radio – control problem. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, no. 55, pp. 89-96. (in Ukrainian)
8. Krasovskii A. A. (1963) *Dinamika nepreryvnykh samonastroyayushchikhsya sistem* [The dynamics of continuous self-adjusting systems]. Moscow, Fizmatgiz, 468 p.
9. Novitskii P. V. (1968) *Osnovy informatsionnoi teorii izmeritel'nykh ustroystv* [Fundamentals of information theory of measurement devices]. Moscow, Energiya, 248 p.
10. Atsyukovskiy V. A. (1974) *Postroyeniye sistem svyazei kompleksov oborudovaniya letatel'nykh apparatov* [Design and construction of communications systems of equipment of aircraft]. Moscow, Sov. Radio, 160 p.
11. Ostapenko Iu. O. (1999) *Identifikatsiya ta modeliuvannia tekhnologichnykh ob'iektiv keruvannia* [Identification and modeling of technological control objects]. Kyiv, Zadruga, 424 p.
12. Bychkovsky, V. A., Reutskaya, Yu. Yu. (2009) Functional possibilities of the system's substitute models. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, no. 39, pp. 23-26. (in Ukrainian)

Бичковський В. О., Реутська Ю. Ю. Оцінка точності та ефективності систем радіокерування рухомими об'єктами. На підставі інформаційного підходу до аналізу процесу радіокерування рухомим об'єктом розглянуто просторово-почасову задачу доставки об'єкта в район цілі. Враховано потенційні можливості системи радіокерування в разі виконання поставленої задачі у просторі та на площині. Визначено залежності точності системи радіокерування від кількості інформації, що надходить в об'єкт керування від керуючої частини. Враховано вплив інформаційної спроможності системи керування на точність керування. Проаналізовано вплив втрат інформації в об'єкті керування та вплив швидкості надходження інформації з керуючої частини на точність радіокерування. Враховано інформаційну спроможність та частотно-квантову спроможність каналу керування, встановлено залежність точності керування від потужності сигналу, потужності шуму та смуги пропускання каналу керування. Проведено оцінку ефективності системи радіокерування.

Ключові слова: радіокерування, точність, ефективність, інформація.

Бычковский В. А., Реутская Ю. Ю. Оценка точности и эффективности систем радиоуправления подвижными объектами. На основе информационного подхода к анализу процесса радиоуправления подвижным объектом рассмотрена пространственно-временная задачу доставки объекта в район цели. Учтены потенциальные

возможности системы радиоуправления при выполнении поставленной задачи в пространстве и на плоскости. Определены зависимости точности системы радиоуправления от количества информации, поступающей в объект управления от управляющей части. Учтено влияние информационной способности системы управления на точность управления. Проанализировано влияние потерь информации в объекте управления и влияние скорости поступления информации из управляющей части на точность радиоуправления. Учтены информационная способность и частотно-квантовая способность канала управления, установлена зависимость точности управления от мощности сигнала, мощности шума и полосы пропускания канала управления. Выполнена оценка эффективности системы радиоуправления.

Ключевые слова: радиоуправление, точность, эффективность, информация.

Bychkovskyi V. O., Reutska Yu. Yu. The accuracy and efficiency estimation of moving objects radio control systems.

Introduction. Control processes are inseparable from the information processes. Therefore, expediency of moving object radio control systems research by methods of information theory becomes clear. The dynamics of the process remains hidden in the case of the radio control effectiveness predicting. Thus, the radio control effectiveness prediction should be considered an urgent task.

Problem statement. From a macroscopic point of view, radio control system solves the problem of meeting the controlled object with the target. For this purpose stand out from the total volume, where the target is, some of the current volume, this is required for the task. In the control system information has to be introduced and revised. In the equation of the current volume rate decrease additional parameters should be considered. It is necessary to assess the impact of data loss and speed the flow of information from the control section to the control object. It is necessary to move from volume to the control object linear deviation from the target. Potential radio system must be considered in the equation.

Theoretical results. Space-time control problem by moving object is viewed from the information point of view. Take into account the potential for a system that provides control process. Dependence of the accuracy of the radio control from level of management process information support is defined. The loss of information influence in the control object is found. The influence of the information receipt from the control section rate on the accuracy of radio control is set.

Conclusion. The quantum-frequency capacity of the control channel and control channel information capacity influence is taken into account. Influences signal power and noise power and bandwidth management are considered. Effectiveness ratio for evaluating the effectiveness of the control channel is determined.

Keywords: radio control, accuracy, efficiency, information.